

辣椒 DBP/DIBP 胁迫及其修复剂优化和机理研究

任旭琴^{1,2}, 高 军^{1,2}, 陈伯清^{1,2}, 骆丹丹¹

(1.淮阴工学院生命科学与化学工程学院, 江苏 淮安 223003; 2.江苏省凹土资源利用重点实验室, 江苏 淮安 223003)

摘要:在研究邻苯二甲酸二丁酯(DBP)和邻苯二甲酸二异丁酯(DIBP)对辣椒生长胁迫效应的基础上,选择凹土、蜂窝煤渣、腐植酸组成混合修复剂,采用 Box-Behnken 试验设计构建回归模型,优化修复剂配方,进而探讨了修复机理。结果表明:土壤中 DBP/DIBP 含量达到 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上时,对辣椒生长和干物质积累有显著抑制作用;回归模型极显著($P < 0.01$),可用于分析预测 DBP/DIBP 的修复效果;修复剂最佳配方为 $15.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 凹土+ $16.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 蜂窝煤渣+ $1.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 腐植酸;施用修复剂后,土壤酶活性显著增强,根系的过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性显著提高,丙二醛(MDA)含量显著降低,根系活跃吸收面积增大,根系活力增强,辣椒干重增加 20.91%。

关键词:凹土;辣椒;邻苯二甲酸二丁酯;邻苯二甲酸二异丁酯

中图分类号:S641.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2015)06-1121-06 **doi:**10.11654/jaes.2015.06.015

Pepper Growth Influenced by and Formula Optimization and Mechanisms of Remediation for DBP/DIBP

REN Xu-qin^{1,2}, GAO Jun^{1,2}, CHEN Bo-qing^{1,2}, LUO Dan-dan¹

(1. Faculty of Life Science & Chemical Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, China; 2. Key Laboratory for Palygorskite Science and Applied Technology of Jiangsu Province, Huaian 223003, China)

Abstract: In the present study, the effects of dibutyl phthalate (DBP) and diisobutyl phthalate (DIBP) on pepper growth were studied, and the remediation formula for DBP/DIBP was also optimized using Box-Behnken experimental design and regression model. Meanwhile, the remediation mechanisms were discussed. The growth and dry weight of pepper were significantly inhibited by $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DBP/DIBP in soil. The regression model predicted the remediation effects of formula applied very well ($P < 0.01$). The optimized formula was $15.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ of attapulgit, $16.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ of honeycomb residue and $1.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ of humic acid. Applying optimized formula significantly increased urease, dehydrogenase, protease and saccharase activities in rhizospheric soil, and improved peroxidase (POD) and catalase (CAT) in pepper roots, but decreased MDA content as compared to the control. Under optimized formula, the area and activity of pepper roots were increased and the dry matter of pepper improved by 20.91%. The application of optimized formula effectively alleviated the negative effects of DBP/DIBP on pepper.

Keywords: attapulgit; pepper; dibutyl phthalate (DBP); diisobutyl phthalate (DIBP)

随着辣椒种植面积的不断扩大,连作障碍愈加严重,已经成为制约辣椒产业可持续发展的瓶颈。连作障碍形成机理包括土传病虫害加剧、土壤理化性状劣化和植物的自毒作用三个方面^[1],其中自毒作用可能是连作障碍的主要原因,土壤性质劣化和土传病虫害加剧只是连作障碍的次生危害^[2]。研究表明,自毒作用

是辣椒连作障碍形成的重要原因之一^[3],辣椒连作会对自身产生毒害,抑制其生长^[4],邻苯二甲酸二丁酯(DBP)和邻苯二甲酸二异丁酯(DIBP)为主要潜在化感物质^[5]。侯永侠等^[6]指出,辣椒根系分泌物中 DBP 的匹配度为 48.87%;耿广东等^[7]认为,辣椒主要的化感物质中,DBP 的含量最高,达到 41.5%;须文^[8]研究表明,辣椒化感作用的优势组分中,DIBP 的相对质量分数最大,为 46.67%。可见,DBP 和 DIBP 是辣椒主要化感物质,它们可能对辣椒的连作障碍起着重要作用。同时,DBP 和 DIBP 作为酞酸酯中应用较多的两种,被广泛用于农膜、杀虫剂、杀菌剂的生产,也已经

收稿日期:2015-03-03

基金项目:江苏省农业科技支撑计划项目(BE2013376);江苏省自然科学基金项目(KB20131216);江苏省大学生实践创新计划项目(201311049055X)

作者简介:任旭琴(1973—),女,山西高平人,博士,副教授,从事园艺植物环境与营养生理研究。E-mail:824332973@qq.com

成为农田土壤中最常被检出的有机污染物^[9-10]。研究表明,我国设施土壤中酞酸酯含量已经达到 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 数量级,东南沿海地区设施土壤中酞酸酯含量在 $3.0 \sim 45.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[9-10],南京城郊典型设施菜地土壤酞酸酯总体污染负荷为 $4.31 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,6种酞酸酯的总量为 $0.15 \sim 9.687 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,DBP 为该地区设施农业土壤的主要酞酸酯种类之一^[11]。因此,弄清楚 DBP 和 DIBP 对辣椒生长的影响,寻找能够有效修复 DBP 和 DIBP 胁迫的措施有现实意义。

任旭琴等^[12]研究表明,适量添加凹土能缓解 DBP 对辣椒的毒害作用,使其膜脂过氧化程度减轻,POD 和 CAT 活性增强,根系活力和吸收能力增强。腐植酸可以促进土壤团粒结构的形成,增加土壤有机质和有效养分含量,改善土壤 pH 值,刺激作物生长发育,对缓解土壤连作障碍也有明显作用^[13]。蜂窝煤渣有强烈吸附作用,对污水 COD 有一定的去除作用,还能在一定程度上改善土壤的透水透气性,煤渣里含有的无机盐也能为植物生长提供一些养分^[14]。可见,利用凹土、蜂窝煤渣和腐植酸修复 DBP/DIBP 胁迫具有很好的可行性。本文通过外源添加 DBP/DIBP 模拟污染土壤,探讨了 DBP/DIBP 对辣椒生长的胁迫效应,应用 Box-Behnken 设计对凹土、蜂窝煤渣和腐植酸的配方进行优化,探讨其修复机制,以期探索一条 DBP/DIBP 的修复途径,为缓解辣椒连作障碍提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

辣椒品种为中华红巨椒,辣椒幼苗购自淮安市蔬菜研究所。

凹土原土采自盱眙白虎山,由江苏省凹土资源利用重点实验室提供,风干研磨过 1 mm 筛;蜂窝煤渣为民用蜂窝煤彻底燃烧后的废弃物,研磨过 1 mm 筛备用;土壤样品采自稻麦轮作的表层农田土,取样深度 0~20 cm,风干捣碎过 5 mm 筛,混入复合肥 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,备用,复合肥含 $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}$ 为 15:15:15。

DBP 和腐植酸购自南京化学试剂有限公司,DIBP 购自阿拉丁化学试剂有限公司。

1.2 试验设计

1.2.1 DBP/DIBP 对辣椒生长的胁迫效应

用丙酮稀释 DBP 和 DIBP,得丙酮-DBP 和丙酮-DIBP 溶液,取风干捣碎的土壤,等量加入丙酮-DBP 溶液和丙酮-DIBP 溶液,使土壤中 DBP 和 DIBP 含量均为 0、10、20、40、80 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别用 T0、T10、T20、

T40、T80 表示,混匀晾干 24 h,让丙酮充分挥发后装盆,泥瓦盆上口径 33 cm,每盆装干土 2.5 kg。定植 6 叶期的辣椒幼苗,定植时抖掉辣椒根系上的基质,及时浇透水,60 d 后测定生长指标及单株干重。每处理 90 盆,3 次重复。

1.2.2 修复剂配方的响应面优化

依据前期单因素试验结果,采用 Box-Behnken 试验设计进行凹土、蜂窝煤渣、腐植酸的优化试验,各组分编码水平见表 1。

表 1 修复剂优化的 Box-Behnken 设计因素水平表

Table 1 Factors and levels of Box-Behnken design for remediation optimization

水平 Level	A:凹土 Attapulgate/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	B:蜂窝煤渣 Honeycomb residue/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	C:腐植酸 Humic acid/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
-1	5	5	0.5
0	15	15	1.5
1	25	25	2.5

土壤处理和测定方法同前。选取 DBP 和 DIBP 含量均为 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤,将土壤分成 15 份,按照表 3 所列 Box-Behnken 试验设计,加入凹土、蜂窝煤渣和腐植酸,充分混匀后装盆,定植辣椒幼苗,60 d 后测定辣椒植株的干重,每处理 30 盆。

采用 Design Expert 8.0.6 软件进行数据处理和分析。

1.2.3 修复剂的作用机制研究

盆栽试验,土壤处理和管理方法同 1.2.2,将土壤分成两份,设置 2 个处理:YH,凹土 $16.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,蜂窝煤渣 $16.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,腐植酸 $1.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;CK,不添加修复剂。60 d 后测定辣椒根际土壤(根系抖落的土壤)酶活性以及根系生理指标,同时验证干重。

1.3 测定方法

采用 0.01 cm 精度的卷尺测量株高和根长;排水法测定根系体积;将辣椒植株整株挖出,洗净根系,在 105°C 下杀青, 70°C 烘至恒重,测定干重;土壤脲酶采用靛酚比色法^[15];脱氢酶活性采用 TTC 还原法^[15];蛋白酶活性采用茚三酮比色法^[16];蔗糖酶采用二硝基水杨酸比色法^[16];根系活力采用 TTC 法^[17];MDA 含量采用硫代巴比妥酸法^[17];POD 活性采用愈创木酚法^[18];CAT 活性采用紫外吸收法^[18]。

2 结果与分析

2.1 DBP/DIBP 对辣椒生长的胁迫效应

由表 2 可知,随着土壤中 DBP/DIBP 含量增大,

表 2 DBP/DIBP 对辣椒生长及干重的影响
Table 2 Effects of DBP/DIBP on growth and dry weight of pepper

处理 Treatment	株高 Height/cm	根长 Root length/cm	根系体积 Root volume/cm ³	干重 Dry weight/g
T0	34.29a	19.41a	4.63a	3.47a
T10	35.25a	19.43a	4.54a	3.46a
T20	28.83b	16.43b	4.07ab	3.09b
T40	24.66bc	15.80b	3.56b	2.42c
T80	21.04c	15.67b	3.63b	2.37c

注:同一列不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different letters indicate significant difference between treatments ($P<0.05$). The same below.

辣椒株高和根系长度均表现出下降趋势,至 20 mg·kg⁻¹ 时与对照(T0)达到差异显著水平,分别仅为对照的 84.08%和 84.64%;受 DBP/DIBP 影响,根系体积也逐渐下降,40 mg·kg⁻¹ DBP/DIBP 以上时,根系体积下降达差异显著水平;干重也表现出与上述生长指标相似的变化规律。可见,DBP/DIBP 高于 20 mg·kg⁻¹ 时,DBP/DIBP 对辣椒产生胁迫效应。

2.2 修复剂的响应面试验

2.2.1 修复剂配方的 Box-Behnken 优化

以辣椒干重为响应值,在前期单因素试验基础上,选用三因素三水平的 Box-Behnken 试验设计,对凹土、蜂窝煤渣和腐植酸混合组成的修复剂配方进行优化(表 3)。

通过多项回归分析,得到三因素与干重之间的回

表 3 Box-Behnken 试验设计及干重响应值
Table 3 Box-Behnken experimental design and results

试验号 ID	A:凹土 Attapulgit/g·kg ⁻¹	B:蜂窝煤渣 Honeycomb residue/g·kg ⁻¹	C:腐植酸 Humic acid/g·kg ⁻¹	干重 Dry weight/g
1	5	5	1.5	2.67
2	25	5	1.5	2.38
3	5	25	1.5	2.4
4	25	25	1.5	3.23
5	5	15	0.5	2.3
6	25	15	0.5	2.8
7	5	15	2.5	3.1
8	25	15	2.5	2.8
9	15	5	0.5	2.6
10	15	25	0.5	2.7
11	15	5	2.5	2.78
12	15	25	2.5	3.04
13	15	15	1.5	3.69
14	15	15	1.5	3.69
15	15	15	1.5	3.77

归模型:
$$Y = -0.015 + 0.159A + 0.122B + 1.750C + 2.800 \times 10^{-3} AB - 0.020AC - 5.383 \times 10^{-3} A^2 - 5.083 \times 10^{-3} B^2 - 0.428C^2$$

式中:Y 为干重的预测值,g;A、B、C 分别代表凹土、蜂窝煤渣和腐植酸的含量。

由于 BC 对干重没有显著影响($P>0.05$),没有进入上述模型。

回归模型方差分析表明(表 4),该模型达到极显著水平($P<0.01$);回归方程的失拟项不显著,为 0.197 5($P>0.05$);回归模型的决定系数 $R^2=0.987\ 4$,说明该模型能解释 98.74%的变化;模型的信噪比为 22.251(>4),表明该模型具有足够的信号强度。由此可见该模型可用于分析和预测修复剂对辣椒干物质积累的影响。

从表 4 可以看出,凹土、蜂窝煤渣和腐植酸对干重均有显著或极显著影响,各因素对辣椒干重影响的顺序依次为 C>B>A,说明三因素对辣椒生长均存在显著正效应;在交互项中,凹土和蜂窝煤渣(AB)、凹土和腐植酸(AC)的互作对干重有极显著影响,而蜂窝煤渣和腐植酸(BC)的影响不显著;三因素的二次项(A^2 、 B^2 、 C^2)对干重也有极显著影响。由此可见,凹土、蜂窝煤渣和腐植酸对辣椒 DBP/DIBP 胁迫有显著修复作用,三者合理配施的效果更好。

2.2.2 模型优化与验证

应用回归模型,按照植株干重最大化原则,得到三因素组成的最佳修复剂配方为:凹土 15.91 g·kg⁻¹、

表 4 回归模型的方差分析
Table 4 Analysis of variance for regression model based on Box-Behnken experimental design

变异来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F值 F value	P 值 P value
模型 Model	3.217	8	0.402	58.89	<0.000 1
A	0.068	1	0.068	10.03	0.019 4
B	0.110	1	0.110	16.18	0.006 9
C	0.218	1	0.218	31.90	0.001 3
AB	0.314	1	0.314	45.93	0.000 5
AC	0.160	1	0.160	23.43	0.002 9
A ²	1.070	1	1.070	156.72	<0.000 1
B ²	0.954	1	0.954	139.74	<0.000 1
C ²	0.677	1	0.677	99.22	<0.000 1
残差 Recidual	0.041	6	0.007		
失拟项 Lack off it	0.037	4	0.009	4.30	0.197 5
误差项 Pure error	0.004	2	0.002		
总变异 Cor total	3.258	14			

注:决定系数 $R^2=0.987\ 4$,信噪比 Adeq-Precision=22.251。

蜂窝煤渣 $16.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、腐植酸 $1.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 辣椒干重的预测值为 3.743 g 。经验证, 辣椒干重的实测值为 3.736 g , 表明预测值和实际值之间存在较高的拟合度, 该模型具有较好的实用价值。添加修复剂后辣椒干物质增加 20.91% , 证实其修复效果显著。

2.3 修复剂的作用机制研究

从表 5 可以看出, 添加修复剂后, 四种土壤酶活性显著增强, 与 CK 相比, 脲酶活性增强 22.30% , 脱氢酶活性增强 49.29% , 蛋白酶和蔗糖酶活性分别增强 43.74% 和 46.24% , 说明修复剂对辣椒根际土壤功能的多样性有明显改善。

表 5 修复剂对辣椒根际土壤酶活性的影响

Table 5 Effect of remediation on enzyme activities rhizospheric soil of pepper

处理 Treatment	脲酶 Urease/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	脱氢酶 Dehydrogenase/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$	蛋白酶 Protease/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$	蔗糖酶 Saccharase/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
CK	1.094b	0.351b	6.372b	4.388b
YH	1.338a	0.524a	9.159a	6.417a

由表 6 可知, 修复剂能有效提高 DBP/DIBP 胁迫下辣椒根系的抗氧化和吸收利用能力, 致使其根系 MDA 含量显著降低, POD 和 CAT 活性显著增强, 根系活力增强和活跃吸收面积增大。从上述结果推测, 修复剂是通过吸附降低根际土壤 DBP/DIBP 浓度, 改善土壤环境, 降低胁迫, 增强根系吸收利用能力, 进而显现修复效果。

3 讨论

作物的连作障碍与其所产生的化感物质密切相关, 化感作用会影响土壤的理化性质和养分状况, 进而影响作物的吸收和利用^[9]。DBP 和 DIBP 是辣椒主要的化感物质^[5-8], 也是农田土壤中常被检出的污染物^[11], 它们可能对辣椒的连作障碍起着重要作用, 弄清楚 DBP/DIBP 对辣椒生长的影响有重要的现实意义。植物可以通过根系从土壤中吸收积累 DBP, 尹睿等^[20]发现, 在辣椒果实、植株及根系中的 DBP 残留量随土壤中施加浓度增加而增加, 辣椒果实中的维生素

C 和辣椒素含量随施加浓度增加而显著下降, 推测辣椒品质的下降主要是由于 DBP 的作用。周宝利等^[21]认为, 邻苯二甲酸二异丁酯对茄子种子萌发和幼苗株高、茎粗、地上部鲜质量、地下部鲜质量、根系活力和叶绿素含量具有“低促高抑”的现象。李铁修等^[22]研究表明, 适当浓度 DBP 对茄子的种子萌发和幼苗生长有促进作用, 但当浓度过大时或在土壤积累过多时则对其生长产生抑制作用。与上述结果类似, 当 DBP/DIBP 含量较高, 达到 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上时, 辣椒生长被显著抑制, 不同的是, 本研究中 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DBP/DIBP 对辣椒生长无明显抑制或促进作用, 可能与试验材料和方法不同有关。

土壤中 DBP/DIBP 污染日趋严重, 但对其修复研究却相对较少。凹土是以凹凸棒石为主要矿物成分的一种稀有天然非金属粘土矿物, 具有良好的吸附性、离子交换性、分散性及环境友好性等特征, 被广泛应用于环境保护、肥料控释技术及土壤改良等方面^[23-24]。刘总堂等^[25]研究认为施加有机黏土可以使六六六有效固定在土壤中, 减少其对环境的危害。腐植酸含有羟基、羧基和酚羟基等活性基团, 对各种有机无机污染物具有强烈的吸持作用, 能够通过疏水作用、配位交换和氢键作用吸附有机污染物, 从而降低有机污染物的毒性^[26]。宋娇艳等^[27]对腐植酸-DBP 复合物红外光谱分析结果表明, 腐植酸对 DBP 有吸附作用, 其机理主要是腐植酸分子与 DBP 分子间发生的氢键相互作用。孙楠等^[28]认为, 凹凸棒土与腐植酸分子间存在范德华力、氢键力、偶极间作用力, 凹凸棒土对腐植酸存在物理吸附, 这种吸附由凹凸棒土多孔性及比表面积决定。本研究表明, 凹土、蜂窝煤渣和腐植酸对 DBP/DIBP 胁迫有显著修复效果, 凹土与蜂窝煤渣、腐植酸之间存在显著互作性, 这种互作可能源于它们之间存在的相互作用力能够使其比表面积增大, 微观孔隙增多, 对 DBP/DIBP 有更强的吸附性, 从而能更好地改善土壤结构和功能, 使土壤结构和养分利用合理^[25]。

土壤酶是土壤的重要组成部分, 参与包括土壤生物化学过程在内的自然界物质循环, 在土壤的发生发

表 6 修复剂对辣椒根系生理指标的影响

Table 6 Effect of remediation on root physiological indices of pepper

处理 Treatment	MDA 含量 MDA content/ $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$	POD 活性 POD activity/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	CAT 活性 CAT activity/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	根系活力 Root activity/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$	活跃吸收面积 Active absorption area/%
CK	3.297a	322.2b	33.98b	83.55b	38.64b
YH	2.303b	384.1a	46.81a	104.59a	45.07a

育以及土壤肥力的形成过程中起着重要作用^[29]。Kandeler 等^[30]认为,土壤酶的功能多样性与土壤功能的多样性紧密相关,土壤生态系统退化都伴随着不同土壤酶活性的下降。土壤酶活性降低,有效养分利用率下降是造成连作障碍的重要原因之一^[31]。因此,本研究认为,合理配施凹土、蜂窝煤渣和腐植酸能使辣椒根际土壤的 DBP/DIBP 有效浓度下降,土壤微生态得到改善,土壤酶活性增强,进而使根系保护酶活性增强,膜脂过氧化降低,根系活跃吸收面积增大和根系活力增强,最终提高有效养分利用率,这是修复剂应对 DBP/DIBP 胁迫的主要机制。

4 结论

当 DBP/DIBP 含量达到 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,辣椒生长和干重被显著抑制,低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时影响不明显。

凹土、蜂窝煤渣和腐植酸的最佳配方含量分别为: 15.91 、 $16.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。验证表明,修复剂对 DBP/DIBP 胁迫有显著修复作用,使辣椒干重增加 20.91% 。

修复剂通过降低土壤中 DBP/DIBP 的有效含量,使土壤酶活性增强,改善土壤微生态,通过增强根系保护酶活性,降低膜脂过氧化,扩大根系活跃吸收面积,增强根系活力,从而提高有效养分利用率,促进辣椒生长。

参考文献:

- [1] 喻景权, 杜尧舜. 蔬菜设施栽培可持续发展中的连作障碍问题[J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(1): 124-126.
YU Jing-quan, DU Yao-shun. Soil-sickness problem in the sustainable development for the protected production of vegetables[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2000, 31(1): 124-126.
- [2] 邱立友, 戚元成, 王明道, 等. 植物次生代谢物的自毒作用及其与连作障碍的关系[J]. 土壤, 2010, 42(1): 1-7.
QIU Li-you, QI Yuan-cheng, WANG Ming-dao, et al. Relationship between secondary metabolite autotoxic to plant and continuous cropping obstacles[J]. *Soils*, 2010, 42(1): 1-7.
- [3] 杨广君, 赵尊练, 巩振辉, 等. 线辣椒根系分泌物对辣椒等受体作物的化感效应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(10): 146-152, 157.
YANG Guang-jun, ZHAO Zun-lian, GONG Zhen-hui, et al. Allelopathy functions of the root exudates of line pepper to pepper and other crops[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2008, 36(10): 146-152, 157.
- [4] 张国斌, 郁继华, 冯致, 等. NO 和 ABA 对辣椒幼苗自毒作用缓解的生理生化机制[J]. 园艺学报, 2013, 40(3): 458-466.
ZHANG Guo-bin, YU Ji-hua, FENG Zhi, et al. Physiological and biochemical mechanisms of nitric oxide and abscisic acid on alleviation to autotoxicity in pepper seedlings[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40(3): 458-466.
- [5] 孙海燕, 王炎. 辣椒根系分泌的潜在化感物质对生菜幼苗抗氧化代谢的影响[J]. 植物生理学通讯, 2012, 48(9): 887-894.
SUN Hai-yan, WANG Yan. Effect of root exudated potential allelochemicals in hot pepper(*Capsicum annuum* L.) on antioxidative metabolism for lettuce(*Lactuca sativa* L.)[J]. *Plant Physiology Journal*, 2012, 48(9): 887-894.
- [6] 侯永侠, 周宝利, 吴晓玲, 等. 辣椒根系分泌物化感作用的研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(4): 504-507.
HOU Yong-xia, ZHOU Bao-li, WU Xiao-ling, et al. Allelopathy of root exudates of pepper[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2007, 38(4): 504-507.
- [7] 耿广东, 张素勤, 程智慧. 辣椒根系分泌物的化感作用及其化感物质分析[J]. 园艺学报, 2009, 36(6): 873-878.
GENG Guang-dong, ZHANG Su-qin, CHENG Zhi-hui. Allelopathy and allelochemicals of root exudates in hot pepper[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2009, 36(6): 873-878.
- [8] 须文. 辣椒化感作用优势组分评价及 GC-MS 鉴定[J]. 长江蔬菜, 2011(18): 46-49.
XU Wen. Evaluation and GC-MS analysis of significant allelopathic components of hot pepper[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2011(18): 46-49.
- [9] Zeng F, Cui K Y, Xie Z Y, et al. Phthalate esters (PAEs): Emerging organic contaminants in agricultural soils in peri-urban areas around Guangzhou, China[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 156(2): 425-434.
- [10] 蔡全英, 莫测辉, 李云辉, 等. 广州、深圳地区蔬菜生产基地土壤中邻苯二甲酸酯(PAEs)研究[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 283-288.
CAI Quan-ying, MO Ce-hui, LI Yun-hui, et al. the Study of PAEs in soils from typical vegetable fields in areas of Guangzhou and Shenzhen, South China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2): 283-288.
- [11] 汪军, 骆永明, 马文亭, 等. 典型设施农业土壤酞酸酯污染特征及其健康风险[J]. 中国环境科学, 2013, 33(12): 2235-2242.
WANG Jun, LUO Yong-ming, MA Wen-ting, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of phthalate esters in typical intensive agricultural soils[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(12): 2235-2242.
- [12] 任旭琴, 高军, 陈伯清, 等. 凹土对辣椒自毒作用修复的生理生化机制研究[J]. 土壤, 2014, 46(5): 908-912.
REN Xu-qin, GAO Jun, CHEN Bo-qing, et al. Physiological and biochemical mechanisms of attapulgitic clay on alleviation to autotoxicity in pepper[J]. *Soils*, 2014, 46(5): 908-912.
- [13] 高亮, 李斌, 贺文强, 等. 活性腐植酸在保护地连作土壤上的应用研究[J]. 腐植酸, 2013(2): 22-27.
GAO Liang, LI Bin, HE Wen-qiang, et al. The application of active humic acid in continuous cropping soil of greenhouse[J]. *Humic Acid*, 2013(2): 22-27.
- [14] 胡立峰, 郑海亮, 成春奇. 粉煤灰去除污水中 COD 的实验研究[J]. 能源环境保护, 2006, 20(3): 30-32.
HU Li-feng, ZHENG Hai-liang, CHENG Chun-qi. Experimental re-

- search on removal of COD from sewage with fly ash[J]. *Energy Environmental Protection*, 2006, 20(3):30-32.
- [15] 李振高, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- LI Zhen-gao, LUO Yong-ming, TENG Ying. Soil and soil microbial research methods[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- GUAN Song-yin. Soil enzyme and its research methods[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1986.
- [17] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- ZOU Qi. Experimental instruction of plant physiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [18] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- GAO Jun-feng. Experimental instruction of plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [19] Batish D R, Sing H P, Pandher J K. Phytotoxic effect of parthenium residues on the selected soil properties and growth of chickpea and tadishi[J]. *Weed Biology and Management*, 2002, 2(2):73-78.
- [20] 尹睿, 林先贵, 王曙光, 等. 农田土壤中酞酸酯污染对辣椒品质的影响[J]. 农业环境保护, 2002, 21(1):1-4.
- YIN Rui, LIN Xian-gui, WANG Shu-guang, et al. Influence of phthalic acid esters in vegetable garden soil on quality of *Capsicum* fruit[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(1):1-4.
- [21] 周宝利, 陈丰, 刘娜, 等. 邻苯二甲酸二异丁酯对茄子黄萎病及其幼苗生长的化感作用[J]. 西北农业学报, 2010, 19(4):179-183.
- ZHOU Bao-li, CHEN Feng, LIU Na, et al. Allelopathy of diisobutyl phthalate to verticillium wilt and seedling growth of eggplant[J]. *Acta Agricultrae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(4):179-183.
- [22] 李轶修, 周宝利, 刘娜, 等. 邻苯二甲酸二丁酯对3种蔬菜作物种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 西北农业学报, 2009, 18(2):217-220, 224.
- LI Yi-xiu, ZHOU Bao-li, LIU Na, et al. Effect of different concentration dibutyl phthalate (DBP) on the germination and seedlings growth of three vegetable seeds[J]. *Acta Agricultrae Boreali-occidentalis Sinica*, 2009, 18(2):217-220, 224.
- [23] 刘左军, 陈正宏, 袁惠君, 等. 凹凸棒石粘土对土壤团聚结构及小麦生长的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(1):142-144.
- LIU Zuo-jun, CHEN Zheng-hong, YUAN Hui-jun, et al. Effect of attapulgite clay on soil aggregate and wheat growth[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(1):142-144.
- [24] 袁惠君, 刘左军, 张旭霞, 等. 凹凸棒石粘土对灌淤土养分含量及小麦生长的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(6):82-84.
- YUAN Hui-jun, LIU Zuo-jun, ZHANG Xu-xia, et al. Effects of attapulgite clay on nutrient content in irrigation-silted soil and wheat growth[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2008, 34(6):82-84.
- [25] 刘总堂, 许敏, 林云青, 等. 有机黏土对污染土中HCH的固定及黑麦草生长的影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(4):533-538.
- LIU Zong-tang, XU Min, LIN Yun-qing, et al. Immobilization of hexachlorocyclohexane and growth of ryegrass by organic clays in soils[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(4):533-538.
- [26] Haitzer M, Burnison B, Hoss S, et al. Effects of quantity, quality and contact time of dissolved organic matter on bioconcentration of benzo(a)pyrene in the nematode *Caenorhabditis elegans* [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1999, 18(3):459-465.
- [27] 宋娇艳, 刘大军, 万洋, 等. 腐植酸吸附邻苯二甲酸二丁酯动力学及红外光谱特征研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(3):1-7.
- SONG Jiao-yan, LIU Da-jun, WANG Yang, et al. Characteristics of isothermal adsorption kinetics of DBP to humic acid and infrared spectroscopic analysis[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science Edition)*, 2014, 36(3):1-7.
- [28] 孙楠, 于水利, 吴冬冬, 等. 凹凸棒土对腐植酸的低温吸附性能研究[J]. 环境工程学报, 2012, 6(2):398-402.
- SUN Nan, YU Shui-li, WU Dong-dong, et al. Adsorption properties of humic acid on attapulgite at temperatures[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(2):398-402.
- [29] 和文祥, 黄英锋, 朱铭莪, 等. 汞和镉对土壤脲酶活性影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(3):412-420.
- HE Wen-xiang, HUANG Ying-feng, ZHU Ming-e, et al. Effect of Hg and Cd on soil urease activity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3):412-420.
- [30] Kandeler E, Luxhoi J, Tschierko M, et al. Xylanase, invertase and protease at the soil-litter interface of a loamy sand[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31:1171-1179.
- [31] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 寒地黑土大豆轮作与连作不同年限土壤酶活性及相关肥力因子的变化[J]. 大豆科学, 2009, 28(4):611-615.
- WANG Shu-qi, HAN Xiao-zeng, QIAO Yun-fa, et al. Variation of soil enzymes activity and relevant nutrients at different years of soybean (*Glycine max* L.) rotation, alternate and continuous cropping[J]. *Soybean Science*, 2009, 28(4):611-615.